

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРОЙ

Ламзин В.А., Ламзин В.В.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия
e-mail: 8465836@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 21.04.2021

Рассматривается задача среднесрочного прогнозирования рациональных характеристик перспективного космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (пространственного разрешения съёмочной аппаратуры, массы и стоимости создания КА). Предложен метод решения задачи, использующий экстраполяционные методы на основе обработки статистических данных по прототипам изделий. Прогнозирование осуществляется экстраполяцией на будущее закономерностей, выявленных в процессе исследования характеристик до настоящего момента. Для реализации данного метода разработан алгоритм поиска, включающий блоки исходных данных, экстраполяционного прогнозирования и оценки характеристик космического аппарата, приведены результаты расчета его технико-экономических характеристик при среднесрочном прогнозировании. Таким образом, предложенный метод позволяет прогнозировать технико-экономические характеристики перспективных модификаций космического аппарата дистанционного зондирования Земли на 7 – 10 лет и обеспечить необходимую точность исследований.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космическая система, перспективный космический аппарат, оптико-электронная съёмочная аппаратура, прогнозирование, технико-экономические характеристики КА.

Введение

В течение последних десятилетий проблемам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), связанным с применением таких систем, разработкой методов анализа изображений, исследованиями в области мониторинга окружающей среды и др., посвящены ряд статей, обзоров и монографий [1–8]. Вопросам выбора состава и параметров космических систем (КС) ДЗЗ, рационального управления их функционированием при наличии технических и технологических ограничений, проведения комплекса работ по восстановлению КС ДЗЗ и расширению технических и технологических возможностей также уделено много внимания в литературе [9–26].

Однако, как показывает опыт разработки, обеспечение эффективного развития КС ДЗЗ возможно при рациональном управлении, основанном на комплексных прогнозных исследова-

ниях техники. Вопросы упреждающего анализа развития КС ДЗЗ, совершенствования методов прогнозирования характеристик космического аппарата (КА) и КС в этом случае приобретают особую актуальность. Совершенствование методов прогнозирования характеристик КА и системы в целом позволит более обоснованно подходить к определению рациональных характеристик техники и технологии средств ДЗЗ. Одновременно прогнозные исследования позволяют планировать кооперацию исполнителей и оптимизировать состав участников работ, что важно при формировании перспективных программ развития космических средств ДЗЗ, и представляют не только научный, но и практический интерес.

Существующие методы прогнозирования характеристик технической системы условно разделяются на три группы: экстраполяционные методы, методы экспертных оценок и комбиниро-

рованные методы [11]. Выбор того или иного метода при прогнозировании характеристик КС ДЗЗ определяется сроками прогноза и имеющейся исходной информацией. В зависимости от сроков различают следующие виды прогноза: краткосрочный (на 1–5 лет), среднесрочный (на 7–10 лет) и долгосрочный (на 11–55 лет). Для оценки характеристик перспективной КС ДЗЗ наибольшее практическое значение имеет среднесрочное прогнозирование.

При разработке проекта технической системы традиционно рассматривают три связанные между собой задачи — прогнозирование условий использования, рациональных (оптимальных) характеристик системы и условий реализации проекта. Применительно к КС ДЗЗ прогнозирование условий использования связано с определением объема задач и условий применения космического аппарата. Новизна работы состоит в том, что в ней впервые разработаны метод решения и проектные модели задачи прогнозирования рациональных характеристик перспективных КА ДЗЗ с оптико-электронной съёмочной аппаратурой (СА) к моменту времени $t_{пр}$, что даёт возможность установить оптимальные параметры КА и сформулировать требования к объектам наземного комплекса приема, обработки и распространения информации к сроку реализации проекта аппарата. Используются методы корреляционного и регрессионного анализа, метод наименьших квадратов, проводится параметрический анализ. Прогнозирование условий реализации основывается на анализе характеристик системы и возможных условий реализации с целью установления оптимальной программы разработки системы.

Постановка задачи и метод решения

Рассматривается задача прогнозирования характеристик перспективного КА ДЗЗ в составе системы, решение которой даёт возможность определить оптимальные параметры аппарата и установить требования к объектам наземного комплекса приема, обработки и распространения информации к сроку реализации проекта $t_{пр}$.

Постановка задачи: по данным выборки (данным оценок характеристик (параметров) $\Pi^0(t)$ для $\forall t_i \in T_{пред}$, где $T_{пред}$ — время предыстории) для образцов-прототипов КА и оптико-электронной съёмочной аппаратуры, реализованным в период $T_{пред}$, получить зависимости в математической форме, отражающие закономерность

(тенденцию) изменения прогнозируемых характеристик к сроку реализации проекта $t_{пр}$. Рассматриваются КА ДЗЗ, оснащённые оптико-электронной СА следующих типов: панхроматического диапазона; мультиспектральных видимого и ближнего ИК-диапазонов; комбинированных (панхроматического и мультиспектральных) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

При прогнозировании характеристик КА ДЗЗ используется метод прямой экстраполяции на основе обработки статистических данных, полученных в образцах-прототипах, реализованных за прошлый период. На основе апостериорной (статистической) информации определяются тенденции изменения параметров в зависимости от времени и технических характеристик. При определении форм связи используются методы корреляционного и регрессионного анализа, когда среди ограниченного числа форм связи ведется поиск такой функции, которой соответствует минимальное среднеквадратическое отклонение, определяются коэффициенты функций. Прогнозирование осуществляется экстраполяцией на будущее закономерностей, выявленных в процессе исследования характеристик до настоящего момента.

Для решения задачи разработан алгоритм поиска, включающий блоки: исходных данных, экстраполяционного прогнозирования и оценки характеристик КА. Блок исходных данных включает информацию о характеристиках КА ДЗЗ с оптико-электронной съёмочной аппаратурой различных типов. В блоке экстраполяционного прогнозирования проводится обработка статистических данных по исследуемой характеристике (параметру). При этом полагается, что реализация параметра является случайной функцией времени (функцией прогноза). Получение зависимости, отражающей закономерность (тенденцию) по данной случайной реализации, представляет значительную проблему. В статье реализация параметра рассматривается как детерминированная функция (математическое ожидание) времени. Прогнозирование параметра Π^* осуществляется экстраполяцией функции $\Pi(t)$ к моменту времени $t_{пр}$, при этом $\Pi^* = \Pi^*(t_{пр})$. Следует отметить, что недостатком такого прогноза является то, что он не учитывает различную степень влияния предыстории на будущее. В блоке оценки характеристик КА ДЗЗ проводится расчет

характеристик перспективного КА ДЗЗ (пространственного разрешения СА, массы и стоимости создания КА) на период прогнозирования.

Последовательность расчёта характеристик:

1. Для заданного времени прогнозирования

$T^* \in [t_{пр}^H, \dots, t_{пр}^K]$ ($t_{пр}^H$ и $t_{пр}^K$ – время начала и окончания прогнозирования соответственно) определяются $\Delta T = T^* - T$ (где T – исходное время) и относительная величина R/H (отношение пространственной разрешающей способности СА R к высоте функционирования КА H).

2. При заданной высоте функционирования КА H и вычисленном значении R/H определяется пространственная разрешающая способность R .

3. По зависимостям, находящимся в блоке экстраполяционного прогнозирования, определяются масса съёмочной аппаратуры $M_{СА}$, масса $M_{КА}$ ($M_{КА} = M_{СА} / \mu_{СА}$, где $\mu_{СА}$ – относительная масса СА, выбирается по табл. 1) и стоимость создания $C_{КА}$ КА ДЗЗ.

Типовой состав современных и перспективных комплексов целевой аппаратуры (КЦА) включает следующие основные подсистемы: съёмочную аппаратуру, радиокomплекс передачи целевой информации (РПЦИ) и прочие элемен-

ты (устройство для калибровки оптической оси, вторичный источник питания, кабельную сеть и др.) [11–14]. Масса КЦА $M_{КЦА}$ в соответствии с её типовым составом представляется в виде суммы масс основных подсистем:

$$M_{КЦА} = M_{СА} + M_{РПЦИ} + M_{пр}^{КЦА},$$

где $M_{СА}$ и $M_{РПЦИ}$ – соответственно масса съёмочной аппаратуры и радиокomплекса передачи целевой информации; $M_{пр}^{КЦА}$ – масса прочих элементов КЦА (межблочной кабельной сети, вторичных источников питания и др.).

Анализ опыта разработки комплекса целевой аппаратуры позволил определить значения относительных масс подсистем КЦА (табл. 1).

Типовая оптико-электронная СА включает в себя: оптическую систему (ОС); оптико-электронный преобразователь (ОЭП); конструкцию и прочие элементы (рис. 1).

Прогнозирование характеристик КА ДЗЗ проводится для оптико-электронной СА следующих типов: панхроматического диапазона; мультиспектрального видимого и ближнего инфракрасного диапазонов; комбинированного (панхроматического и мультиспектральных) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Таблица 1

Значения относительных масс подсистем КЦА

| Наименование подсистемы КЦА | Тип СА | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------|
| | Панхроматическая | Мультиспектральная | Комбинированная |
| Съёмочная аппаратура | 0,240 | 0,220 | 0,180 |
| Радиокomплекс передачи целевой информации | 0,083 | 0,081 | 0,087 |
| Прочие элементы | 0,028 | 0,025 | 0,015 |

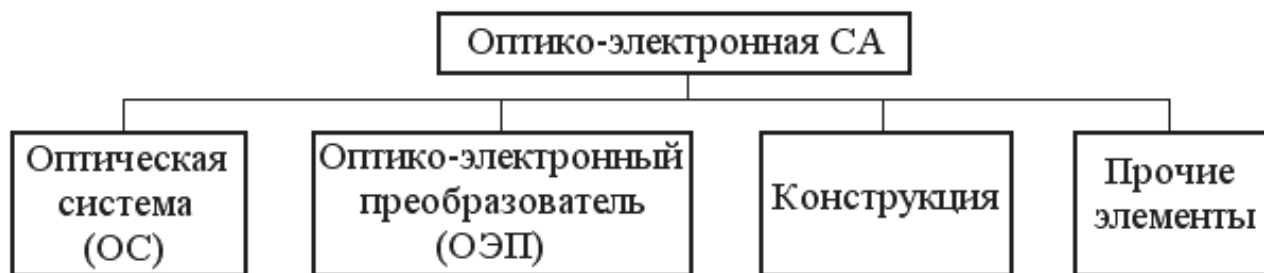


Рис. 1. Состав типовой оптико-электронной СА

Прогнозирование характеристик КА ДЗЗ с оптико-электронной панхроматической съемочной аппаратурой видимого диапазона

Статистические данные по образцам-прототипам КА ДЗЗ с оптико-электронной панхроматической съемочной аппаратурой видимого диапазона приведены в табл. 2 [19–26].

В блоке экстраполяционного прогнозирования определена связь относительной величины R/H с временем разработки:

$$R/H = 8 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^{-2,0798}$$

при $9,07 \cdot 10^{-7} \leq R/H \leq 2,29 \cdot 10^{-3}$, (1)

где $\Delta T = T^* - T$ (T – исходное время ($T = 1993$), T^* – время прогнозирования).

Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от времени разработки T КА ДЗЗ с панхроматической СА видимого диапазона показана на рис. 2.

Связь относительной величины R/H (б/р) с массой панхроматической СА $M_{СА}^П$ (кг) видимого диапазона представляется в виде

$$R/H = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (M_{СА}^П)^{-0,922}$$

при $9,07 \cdot 10^{-7} \leq R/H \leq 2,29 \cdot 10^{-3}$. (2)

Таблица 2

Основные характеристики панхроматической СА

| № п/п | Наименование СА | Наименование КА | Год запуска | ΔT , лет | Высота орбиты H , км | Разрешение R , м | R/H , б/р | Масса $M_{СА}^П$, кг |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | PAN 1 | Posat-1 | 1993 | 3 | 800 | 200 | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | 5 |
| 2 | PAN 2 | Ofeq-3 | 1995 | 5 | 369x729 | 2 | $5,42 \cdot 10^{-5}$ | 36 |
| 3 | PAN 3 | Fasat-Alfa | 1995 | 5 | 873 | 2000 | $2,29 \cdot 10^{-3}$ | 3,5 |
| 4 | PAN 4 | Irs-1D | 1997 | 7 | 738x824 | 6 | $8,13 \cdot 10^{-6}$ | 150 |
| 5 | PAN 5 | Fasat-Bravo | 1998 | 8 | 835 | 100 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | 3 |
| 6 | PAN 6 | Tmsat | 1998 | 8 | 835 | 80 | $9,58 \cdot 10^{-6}$ | 3 |
| 7 | HRS | Spot-5 | 2002 | 12 | 822 | 5 | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 10,1 |
| 8 | PAN 7 | Bilsat-1 | 2003 | 13 | 650 | 12 | $1,85 \cdot 10^{-5}$ | 13 |
| 9 | RAL | Topsat-1 | 2005 | 15 | 682 | 2,5 | $3,67 \cdot 10^{-6}$ | 45 |
| 10 | PAN | Irs-P5 | 2005 | 15 | 620 | 2,5 | $4,03 \cdot 10^{-6}$ | 200 |
| 11 | Опсат-К | КА ДЗЗ | 2006 | 16 | 700 | 15 | $2,14 \cdot 10^{-5}$ | 17,4 |
| 12 | WV-60 | WorldView-1 | 2007 | 17 | 496 | 0,45 | $9,07 \cdot 10^{-7}$ | 380 |
| 13 | СА 1 | КА ДЗЗ | 2010 | 20 | 540 | 0,87 | $1,61 \cdot 10^{-6}$ | 90 |
| 14 | СА 2 | КА ДЗЗ | 2010 | 20 | 600 | 0,6 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | 115 |
| 15 | СА 3 | КА ДЗЗ | 2010 | 20 | 600 | 2 | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | 30 |

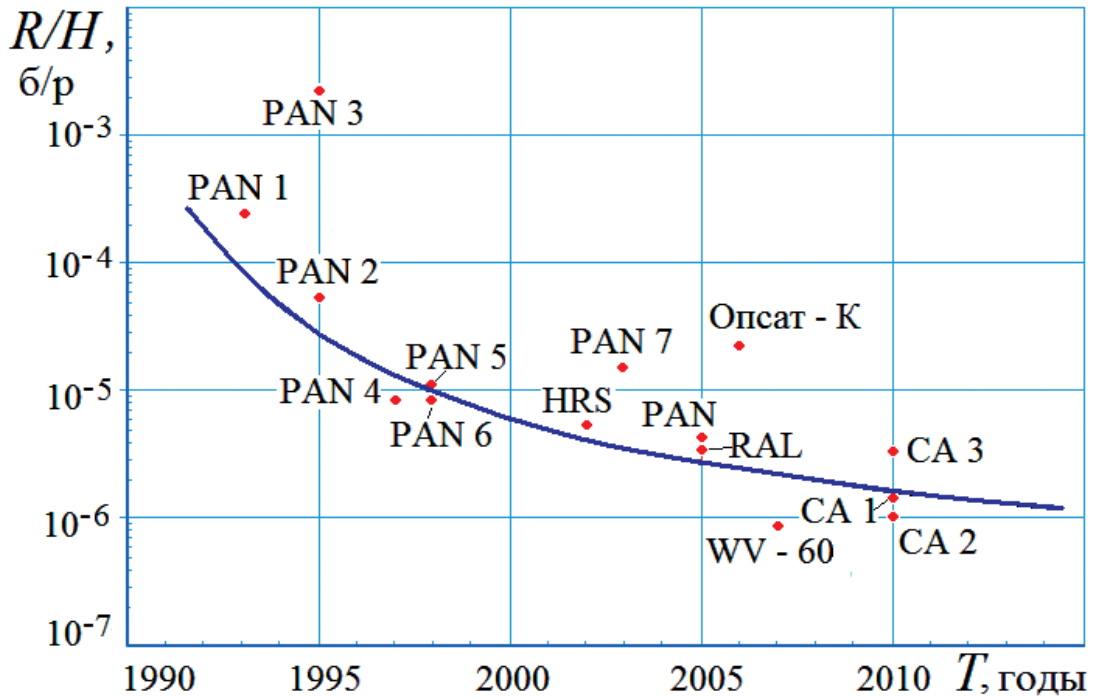


Рис. 2. Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от времени разработки T панхроматической СА видимого диапазона

Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от массы панхроматической СА $M_{СА}^П$ видимого диапазона показана на рис. 3.

Основные технико-экономические характеристики КА ДЗЗ с панхроматической СА видимого диапазона приведены в табл. 3 [12, 14, 20–22].

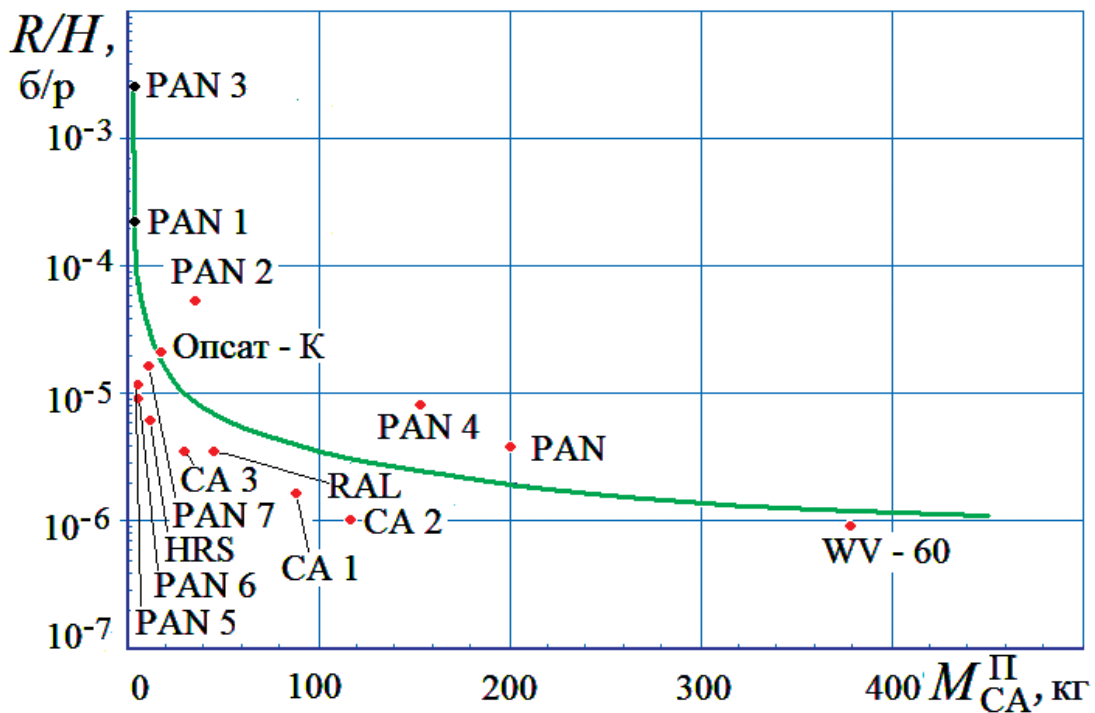


Рис. 3. Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от массы $M_{СА}^П$ панхроматической СА

Таблица 3

Основные технико-экономические характеристики КА ДЗЗ с панхроматической СА

| № п/п | Наименование КА | Страна | Год запуска | Разрешение, м | Высота орбиты, км | Масса КА, кг | Стоимость, млн у. е. |
|-------|-----------------|--------------------|-------------|---------------|-------------------|--------------|----------------------|
| 1 | Uosat-5 | Англия | 1991 | 2000 | 770 | 48,4 | 2 |
| 2 | Posat-1 | Португалия | 1993 | 200 | 800 | 50 | 0,5 |
| 3 | Eros-A | Израиль | 2000 | 1,8 | 500 | 250 | 90 |
| 4 | Tiungsat-1 | Малайзия | 2000 | 80 | 640 | 50 | 3 |
| 5 | Tes | Индия | 2001 | 1 | 570 | 1108 | 44 |
| 6 | ZY-2A | Китай | 2002 | 3 | 480 | 1500 | 45 |
| 7 | Cbers-3 | Китай/ Бразилия | 2003 | 3 | 770 | 1447 | 65 |
| 8 | Topsat-1 | Англия | 2005 | 2,5 | 682 | 130 | 24,9 |
| 9 | Irs-P5 | Индия | 2005 | 2,5 | 620 | 1560 | 90 |
| 10 | Eros-B | Израиль | 2006 | 1,8 | 500 | 290 | 110 |
| 11 | WordView-1 | США | 2007 | 0,45 | 450 | 2500 | 200 |

Связь стоимости КА ДЗЗ $C_{КА}^П$ (млн у. е.) с массой $M_{КА}^П$ (кг) представляется в виде

$$C_{КА}^П = 5,76 \cdot 10^{-2} \cdot M_{КА}^{П 1,0299} \quad (3)$$

при $48,4 \leq M_{КА}^П \leq 2500$.

Тенденция изменения стоимости $C_{КА}^П$ в зависимости от массы $M_{КА}^П$ КА ДЗЗ с панхроматической СА видимого диапазона показана на рис. 4.

Результаты расчета характеристик КА ДЗЗ (пространственного разрешения СА, массы и

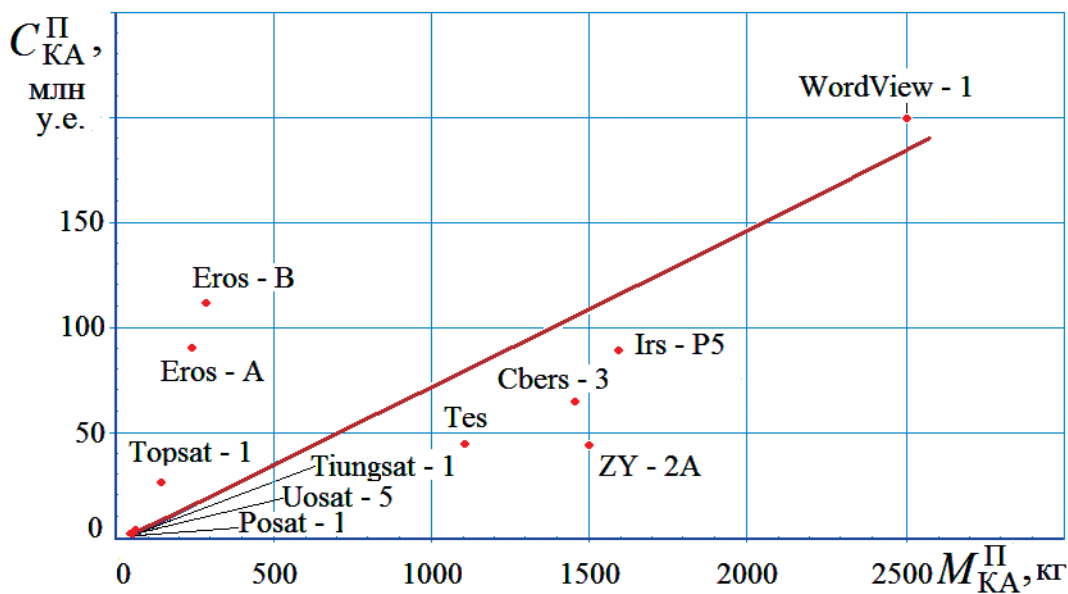


Рис. 4. Тенденция изменения стоимости $C_{КА}^П$ в зависимости от массы $M_{КА}^П$ КА ДЗЗ с панхроматической СА

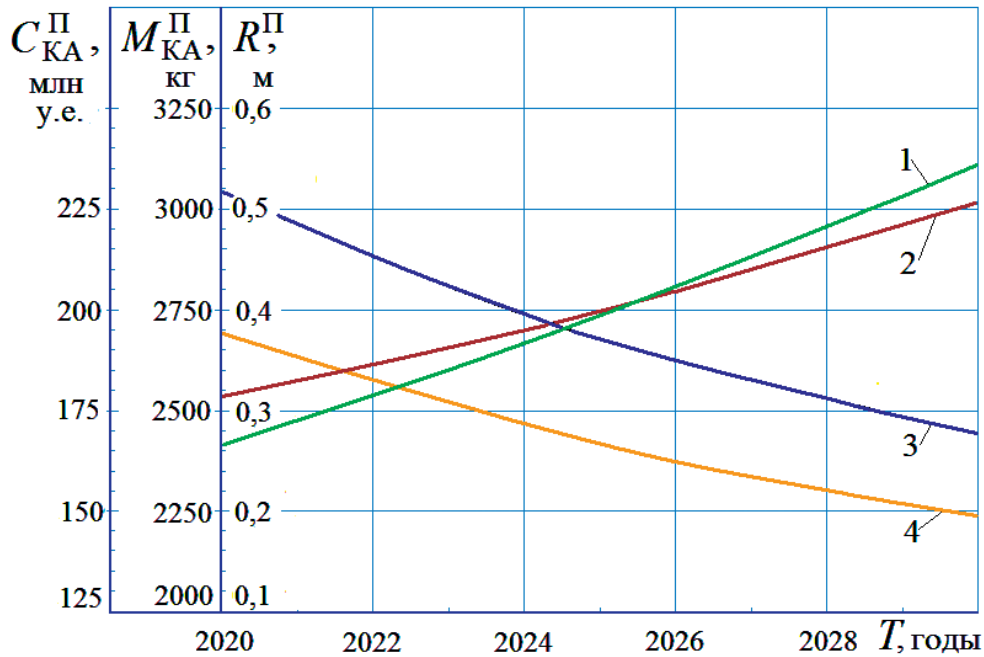


Рис. 5. Результаты расчета характеристик КА ДЗЗ (пространственного разрешения СА, массы и стоимости создания КА) с панхроматической СА видимого диапазона на период прогнозирования 10 лет (2020—2030 гг.): 1 – $M_{КА}^П$; 2 – $C_{КА}^П$; 3 – $R^П$ ($H = 618$ км); 4 – $R^П$ ($H = 450$ км)

стоимости создания КА) с панхроматической СА видимого диапазона на период прогнозирования 10 лет (2020—2030 гг.) представлены на рис. 5.

Прогнозирование характеристик КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Статистические данные по образцам-прототипам КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов приведены в табл. 4 [19–26].

В блоке экстраполяционного прогнозирования определена связь относительной величины R/H с временем разработки:

$$R/H = 1,0 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^{-0,7497} \quad (4)$$

при $2 \cdot 10^{-2} \leq R/H \leq 4 \cdot 10^{-6}$,

где $\Delta T = T^* - T$ (T – исходное время ($T = 1995$), T^* – время прогнозирования).

Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от времени разработки T КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов показана на рис. 6.

Связь относительной величины R/H (б/р) с массой оптико-электронной мультиспектральной СА $M_{КА}^М$ (кг) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов представляется в виде

$$R/H = 4 \cdot 10^{-4} \cdot (M_{КА}^М)^{-0,8441} \quad (5)$$

при $10^{-3} \leq R/H \leq 4 \cdot 10^{-6}$.

Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от массы оптико-электронной мультиспектральной СА $M_{КА}^М$ (кг) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов показана на рис. 7.

Основные технико-экономические характеристики КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов приведены в табл. 5 [12, 14, 20–22].

Связь стоимости КА ДЗЗ $C_{КА}^М$ (млн у. е.) с массой $M_{КА}^М$ (кг) представляется в виде

$$C_{КА}^М = 8,9 \cdot 10^{-2} \cdot M_{КА}^М 1,3787 \quad (6)$$

при $40 \leq M_{КА}^М \leq 5000$.

Тенденция изменения стоимости $C_{КА}^М$ в зависимости от массы $M_{КА}^М$ и результаты расчета характеристик (пространственного разрешения СА, массы и стоимости создания аппарата) КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов на период прогнозирования 10 лет (2020—2030 гг.) показаны на рис. 8 и 9.

Таблица 4

Основные характеристики мультиспектральной СА

| № п/п | Наименование СА | Страна | Год запуска КА | ΔT , годы | Высота орбиты H , км | Разрешение R , м | R/H , б/п | Масса $M_{СА}^M$, кг |
|-------|-----------------|----------|----------------|-------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | HRVIR | Франция | 1998 | 3 | 832 | 10 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | 250 |
| 2 | СА SSTL | Англия | 1999 | 4 | 650 | 26 | $4,0 \cdot 10^{-5}$ | 12 |
| 3 | КОЭ-500 | РФ | 2003 | 8 | 500 | 7 | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | 14 |
| 4 | JSS-54 | Германия | 2003 | 8 | 600 | 4,2 | $7,0 \cdot 10^{-6}$ | 30 |
| 5 | КОЭ-03 | РФ | 2003 | 8 | 1000 | 75 | $7,5 \cdot 10^{-5}$ | 9,6 |
| 6 | EOS-A | Ю. Корея | 2003 | 8 | 650 | 10 | $1,54 \cdot 10^{-5}$ | 12 |
| 7 | Локос-301 | РФ | 2004 | 9 | 600 | 26 | $4,33 \cdot 10^{-5}$ | 6 |
| 8 | РДСА | РФ | 2005 | 10 | 550 | 25 | $4,55 \cdot 10^{-5}$ | 27 |
| 9 | Локос-401 | РФ | 2006 | 11 | 600 | 50 | $8,33 \cdot 10^{-5}$ | 6 |
| 10 | БК | РФ | 2006 | 11 | 600 | 48 | $8,0 \cdot 10^{-5}$ | 3,5 |
| 11 | JSS-56 | Германия | 2008 | 13 | 634 | 6,5 | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | 34 |
| 12 | СА 4 | РФ | 2010 | 15 | 800 | 0,6 | $7,5 \cdot 10^{-7}$ | 60 |
| 13 | СА 5 | РФ | 2010 | 15 | 800 | 1,0 | $1,25 \cdot 10^{-6}$ | 60 |
| 14 | СА 6 | РФ | 2010 | 15 | 600 | 2,1 | $3,5 \cdot 10^{-6}$ | 50 |
| 15 | СА 7 | РФ | 2010 | 15 | 600 | 23 | $3,83 \cdot 10^{-5}$ | 95 |
| 16 | СА 8 | РФ | 2010 | 15 | 600 | 47 | $7,83 \cdot 10^{-5}$ | 30 |
| 17 | СА 9 | РФ | 2010 | 15 | 510 | 25 | $4,9 \cdot 10^{-5}$ | 16 |
| 18 | СА 10 | РФ | 2010 | 15 | 650 | 20 | $3,08 \cdot 10^{-5}$ | 30 |
| 19 | СА 11 | РФ | 2010 | 15 | 830 | 1000 | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | 25 |

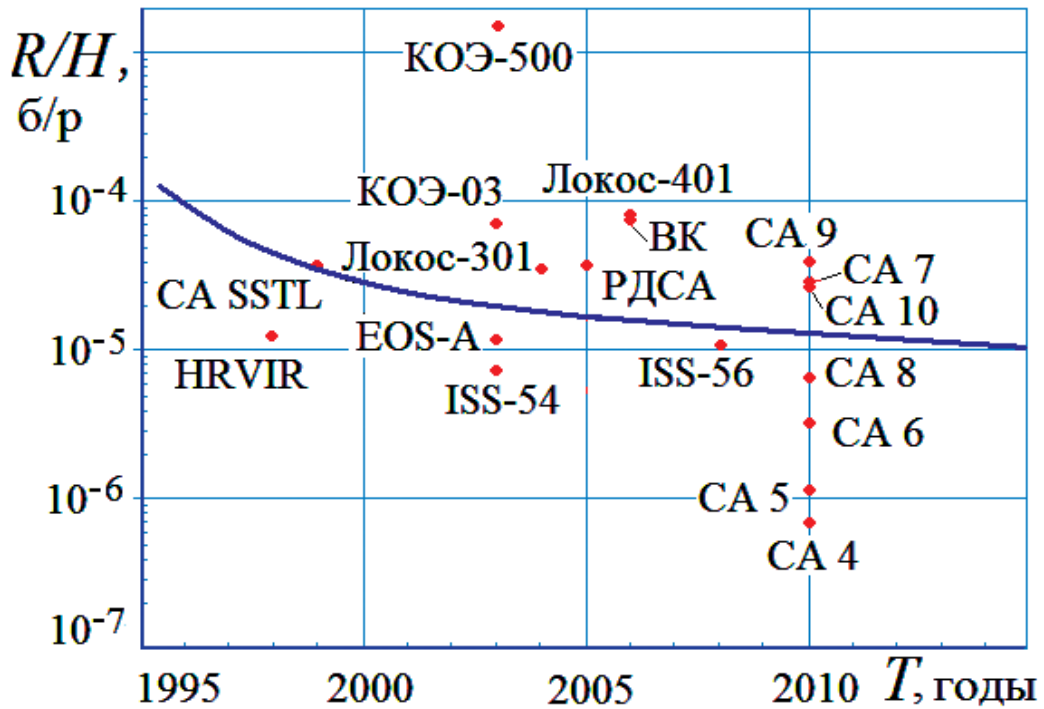


Рис. 6. Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от времени разработки T КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

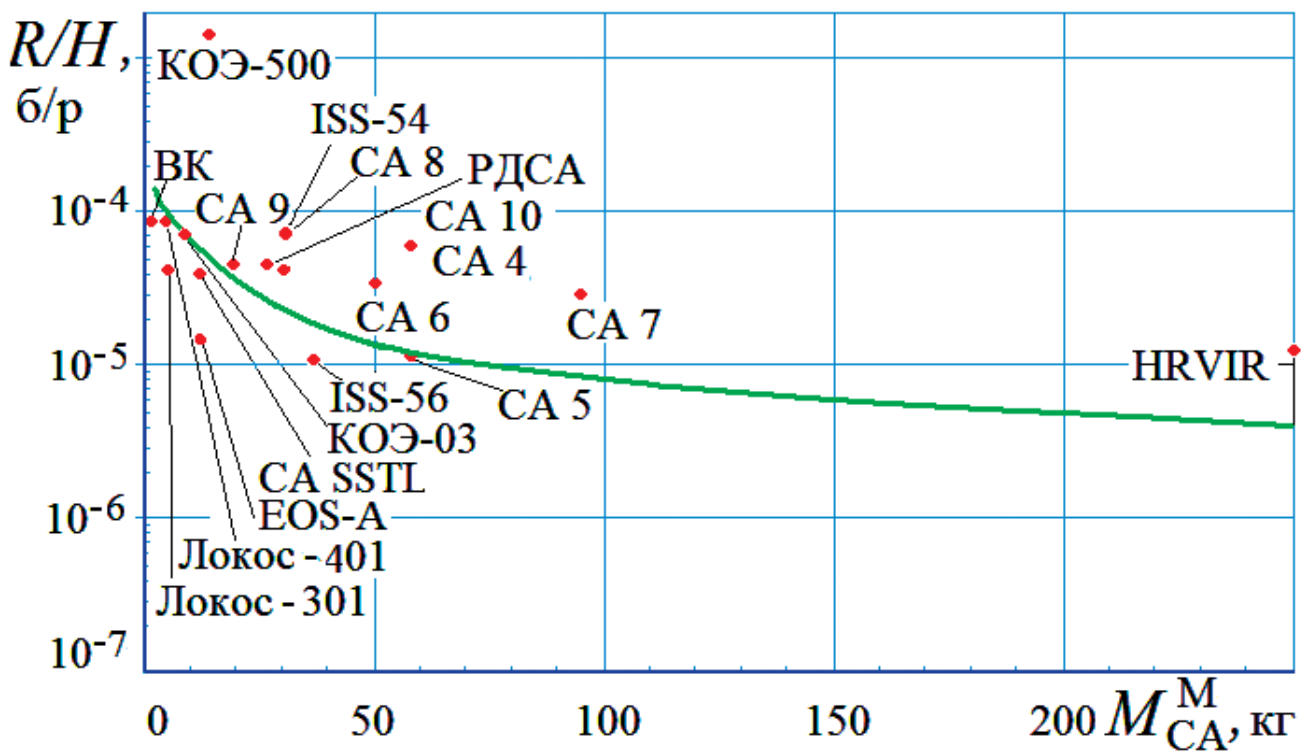


Рис. 7. Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от массы оптико-электронной мультиспектральной СА $M_{СА}^M$ (кг) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Таблица 5

Основные технико-экономические характеристики КА

| № п/п | Наименование КА | Страна | Год запуска | Разрешение, м | Высота орбиты, км | Масса КА, кг | Стоимость КА, млн у.е. |
|-------|-----------------|---------------------|-------------|---------------|-------------------|--------------|------------------------|
| 1 | Landsat -5TM | США | 1984 | 30 | 705 | 1941 | 250 |
| 2 | Irs-1A/1B | Индия | 1988 | 36 | 890 | 975 | 20 |
| 3 | Mecb-SCD | Бразилия | 1992 | 200 | 750 | 115 | 20 |
| 4 | Resource 21 | США | 1999 | 10 | 743 | 540 | 500 |
| 5 | Tsinghua-1 | Китай | 2000 | 39 | 750 | 49 | 2 |
| 6 | OrbView-2 | США | 2001 | 1100 | 705 | 309 | 25 |
| 7 | Alsat-1 | Алжир | 2002 | 32 | 650 | 90 | 2 |
| 8 | Bnscsat | Англия | 2003 | 32 | 650 | 90 | 2 |
| 9 | Nigeriasat-1 | Нигерия | 2003 | 32 | 650 | 90 | 2 |
| 10 | RapidEye | Германия/ Канада | 2008 | 6,5 | 634 | 156 | 20 |

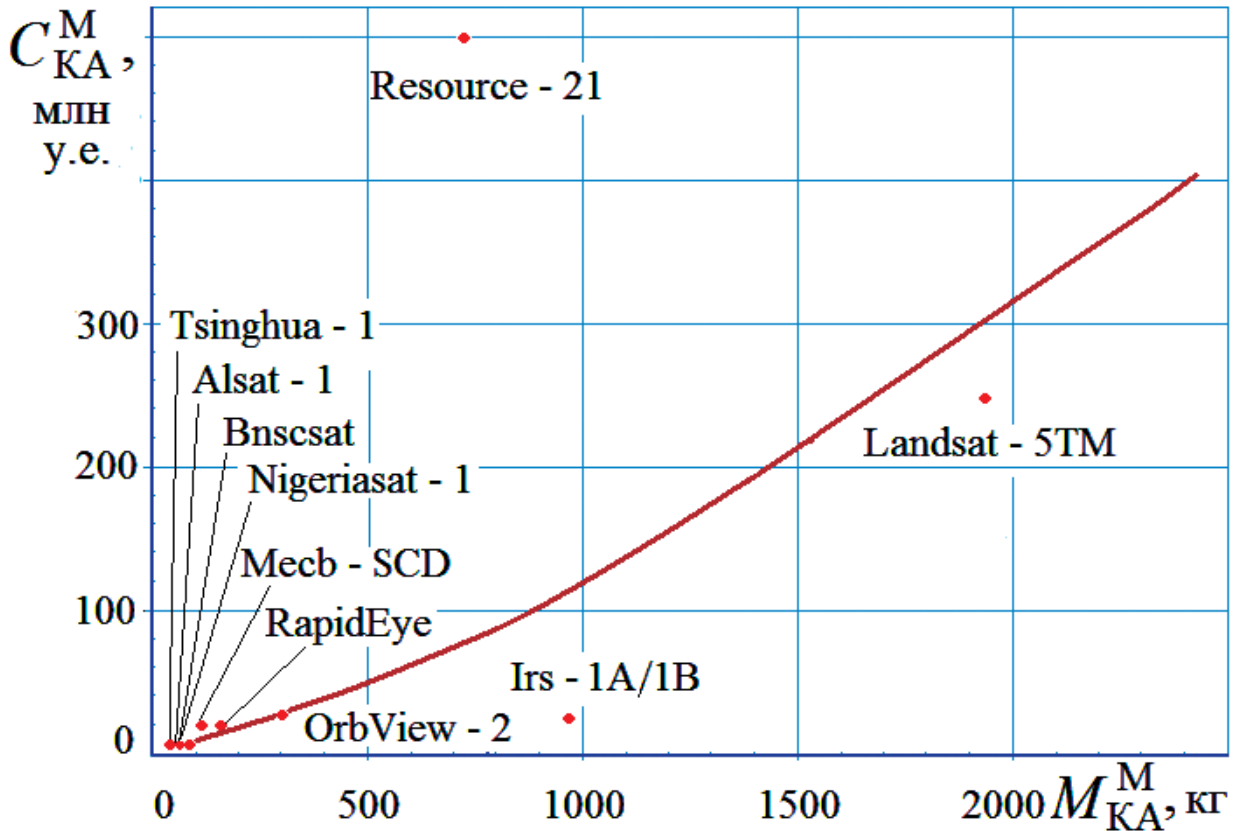


Рис. 8. Тенденция изменения стоимости $C_{КА}^M$ в зависимости от массы $M_{КА}^M$ КА ДЗЗ с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

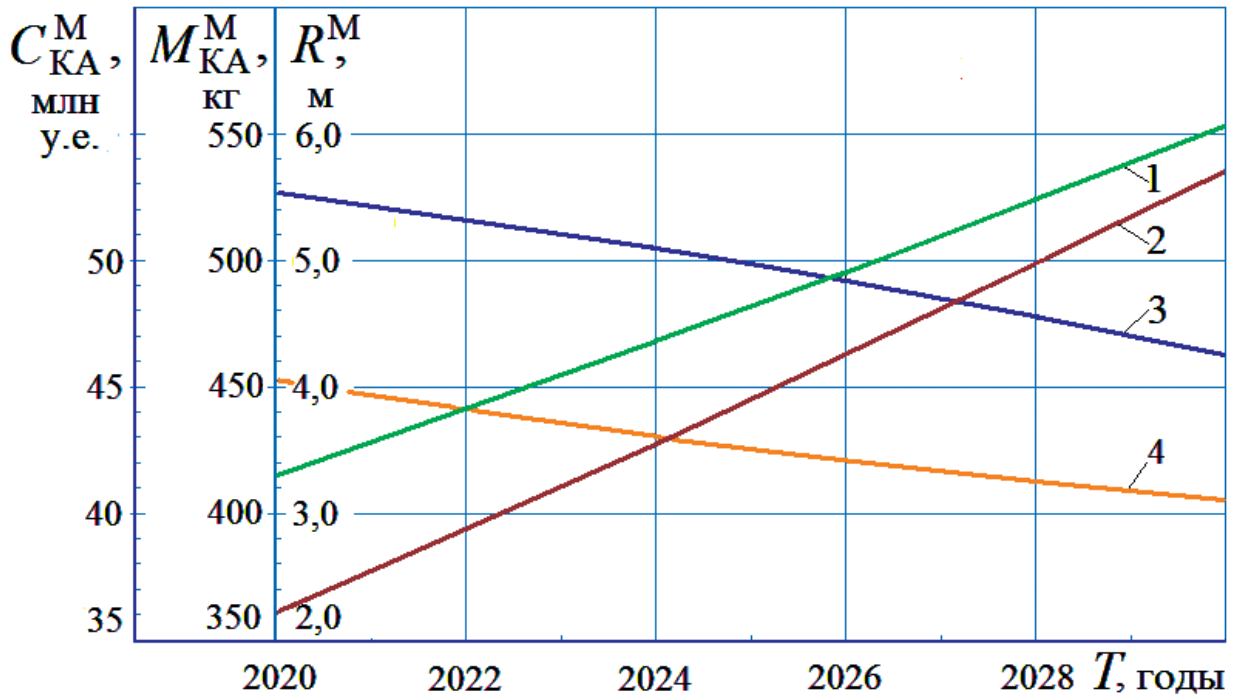


Рис. 9. Результаты расчета характеристик КА ДЗЗ (пространственного разрешения СА, массы и стоимости создания КА) с оптико-электронной мультиспектральной СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов на период прогнозирования 10 лет (2020—2030 гг.): 1 – C_{KA}^M ; 2 – M_{KA}^M ; 3 – R^M ($H = 618$ км); 4 – R^M ($H = 450$ км)

Прогнозирование характеристик КА ДЗЗ с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Статистические данные по образцам-прототипам КА ДЗЗ с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов приведены в табл. 6 [19—26].

В блоке экстраполяционного прогнозирования определена связь относительной величины R/H с временем разработки:

$$R/H = 1,223 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T^{-0,8494} \quad (7)$$

при $1,21 \cdot 10^{-5} \leq R/H \leq 5,5 \cdot 10^{-7}$,

где $\Delta T = T^* - T$ (T – исходное время ($T = 1985$), T^* – время прогнозирования).

Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от времени разработки T КА ДЗЗ с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов показана на рис. 10.

Связь относительной величины R/H (б/п) с массой M_{KA}^K (кг) с оптико-электронной комби-

нированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов представляется в виде:

$$R/H = 8,339 \cdot 10^{-5} \cdot (M_{KA}^K)^{-0,7928} \quad (8)$$

при $1,01 \cdot 10^{-6} \leq R/H \leq 5,5 \cdot 10^{-7}$.

Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от массы комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА M_{KA}^K видимого и ближнего инфракрасного диапазонов показана на рис. 11.

Основные технико-экономические характеристики КА ДЗЗ с комбинированной СА приведены в табл. 7 [12, 14, 20—22].

Связь стоимости КА ДЗЗ C_{KA}^K (млн долл. США) с массой M_{KA}^K (кг) представляется в виде

$$C_{KA}^K = 62,22 \cdot 10^{-2} \cdot M_{KA}^K 0,7474 \quad (9)$$

при $129 \leq M_{KA}^K \leq 2720$.

Тенденция изменения стоимости C_{KA}^K в зависимости от массы M_{KA}^K КА ДЗЗ с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной

Таблица 6

Основные характеристики комбинированной СА

| № п/п | Наименование СА | Страна | Год запуска | ΔT , годы | Высота орбиты H , км | Разрешение R , м | R/H , б/р | Масса $M_{СА}^K$, кг |
|-------|-----------------|---------|-------------|-------------------|------------------------|--------------------|---|-----------------------|
| 1 | HRV | Франция | 1986 | 1 | 825 | 10/20 | $1,21/2,42 \cdot 10^{-5}$ | 250 |
| 2 | OSA | США | 1999 | 14 | 680 | 0,82/3,2 | $1,21/4,71 \cdot 10^{-6}$ | 171 |
| 4 | BHRC-60 | США | 2005 | 20 | 450 | 0,61/2,44 | $1,36/5,42 \cdot 10^{-6}$ | 296 |
| 5 | GIS | США | 2008 | 23 | 684 | 0,41/1,64 | $6 \cdot 10^{-7} / 2,4 \cdot 10^{-6}$ | 470 |
| 6 | CA15 | РФ | 2010 | 25 | 670 | 1/4 | $1,49/5,97 \cdot 10^{-6}$ | 200 |
| 7 | CA13 | РФ | 2010 | 25 | 680 | 1,5/3 | $2,21/4,42 \cdot 10^{-6}$ | 100 |
| 8 | CA (F) | Франция | 2011 | 26 | 695 | 0,7/2,1 | $1,01/3,02 \cdot 10^{-6}$ | 195 |
| 9 | GIS-2 | США | 2016 | 31 | 618 | 0,34/1,36 | $5,5 \cdot 10^{-7} / 2,2 \cdot 10^{-6}$ | 470 |

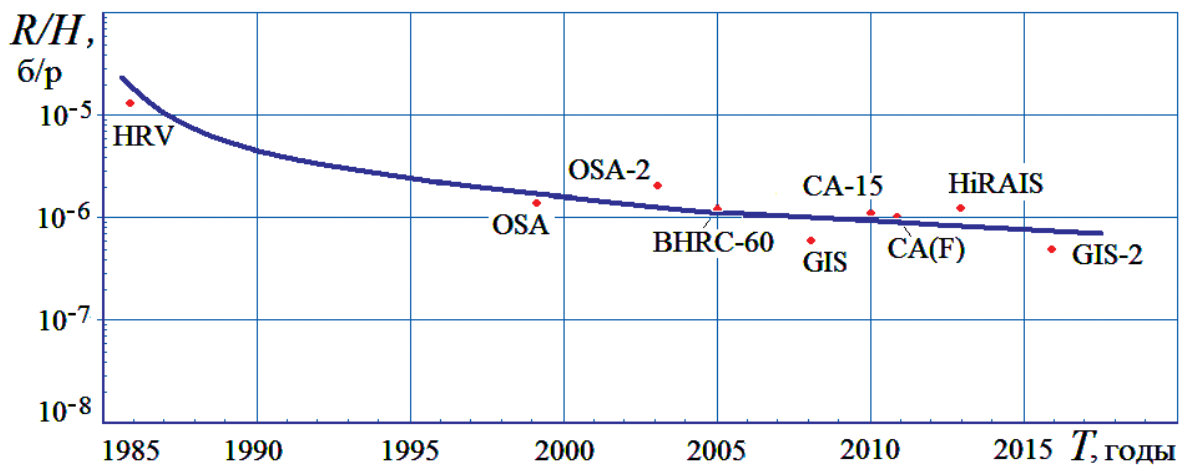


Рис. 10. Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от времени разработки T КА ДЗЗ с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов показана на рис. 12.

Результаты расчета характеристик КА ДЗЗ (пространственного разрешения, массы и стоимости создания КА) с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхро-

матической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов на период прогнозирования 10 лет (2020—2030 гг.) приведены на рис. 13.

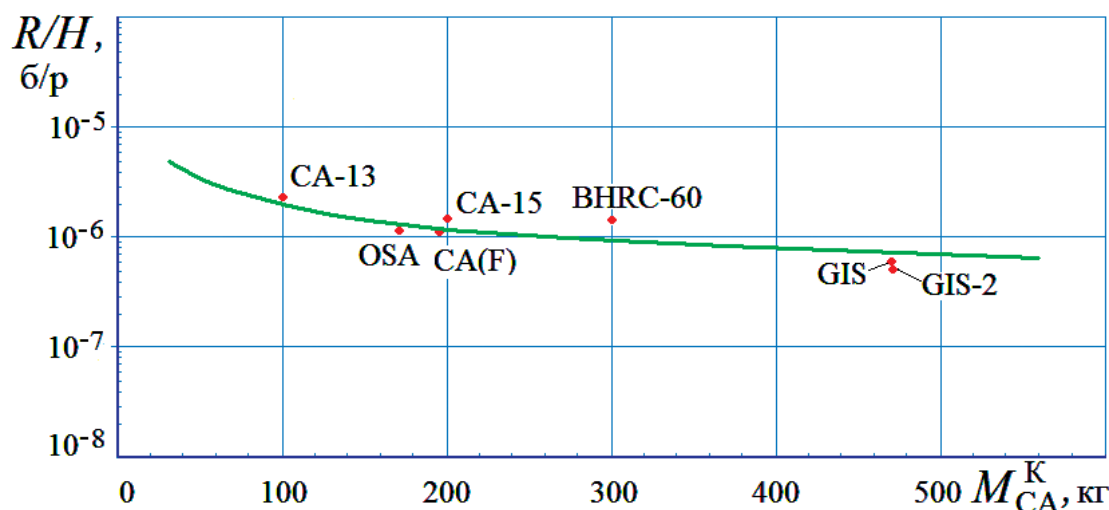


Рис. 11. Тенденция изменения относительной величины R/H в зависимости от массы комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА M_{CA}^K видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

Таблица 7

Основные технико-экономические характеристики КА

| № п/п | Наименование КА | Страна | Год запуска | Разрешение, м | Высота орбиты, км | Масса КА, кг | Стоимость КА, млн у. е. |
|-------|-----------------|--------------------|-------------|---------------|-------------------|--------------|-------------------------|
| 1 | Landsat -6ETM | США | 1993 | 15/30 | 705 | 2720 | 256,6 |
| 2 | Spot - 3 | Франция | 1993 | 10/20 | 824 | 1870 | 87 |
| 3 | Ikonos- 2 | США | 1999 | 0,82/3,2 | 680 | 726 | 60 |
| 4 | Cbers-1 | Китай/ Бразилия | 1999 | 10/20 | 778 | 1400 | 35 |
| 5 | Eros-A1 | Израиль | 2000 | 1,8/ | 480 | 250 | 100 |
| 6 | QuickBird-2 | США | 2001 | 0,61/2,44 | 450 | 980 | 245 |
| 7 | Spot-5 | Франция | 2002 | 5/10 | 3030 | 816 | 140 |
| 8 | Igs-1A/1B | Япония | 2003 | 1/5 | 490 | 850 | 20 |
| 9 | Bilsat-1 | Турция | 2003 | 12/26 | 650 | 129 | 2 |
| 10 | OrbView-3 | США | 2003 | 1/4 | 470 | 360 | 125 |
| 11 | Eros-B1 | Израиль | 2006 | 0,82/ | 500 | 290 | 110 |
| 12 | GeoEye-1 | США | 2008 | 0,41/0,64 | 684 | 1955 | 350 |
| 13 | Dubaisat 1 | ОАЭ | 2009 | 2,5/5 | 678 | 200 | 49,3 |
| 14 | KompSat-3 | Ю. Корея | 2012 | 0,7/2,8 | 700 | 1000 | 240 |
| 15 | Dubaisat 2 | ОАЭ | 2013 | 1/4 | 600 | 300 | 49,3 |
| 16 | Deimos-2 | Испания | 2014 | 0,75/5 | - | 310 | 78 |
| 17 | WordView-4 | США | 2016 | 0,34/1,36 | 618 | 2087 | 155 |

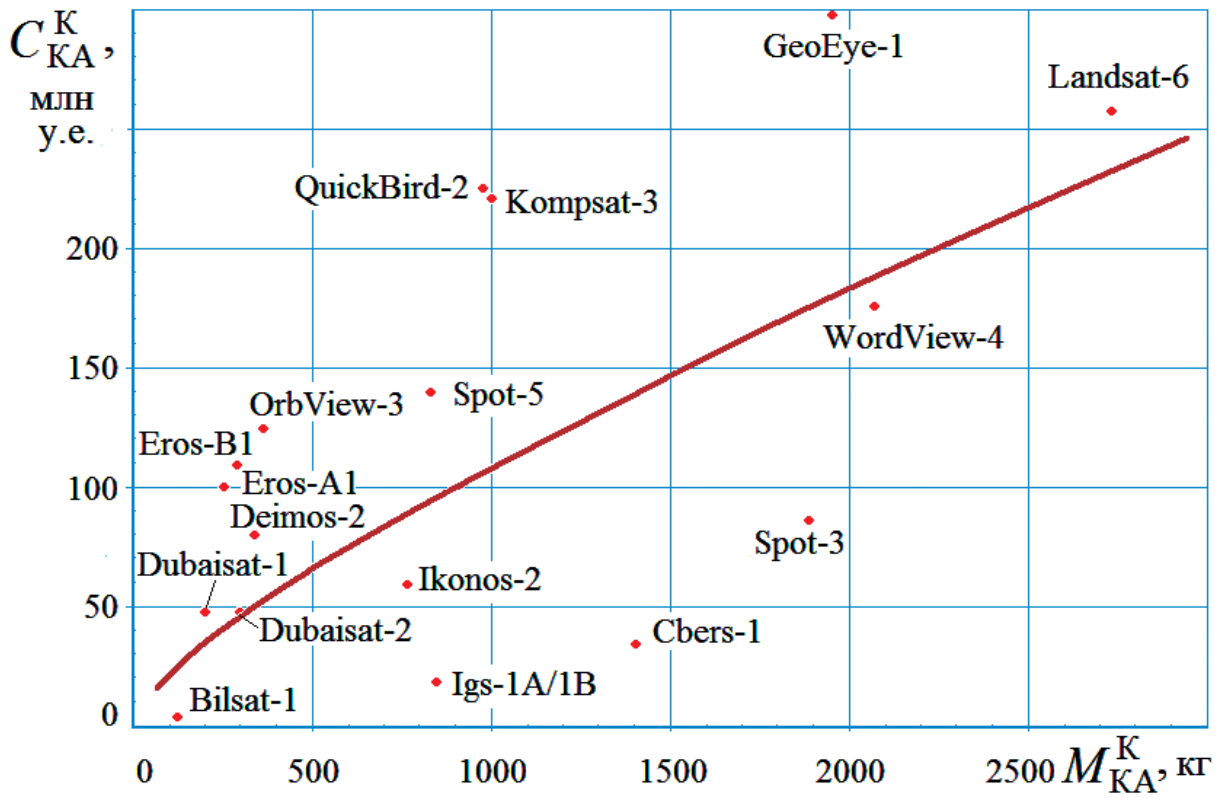


Рис. 12. Тенденция изменения стоимости C_{KA}^K в зависимости от массы M_{KA}^K КА ДЗЗ с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов

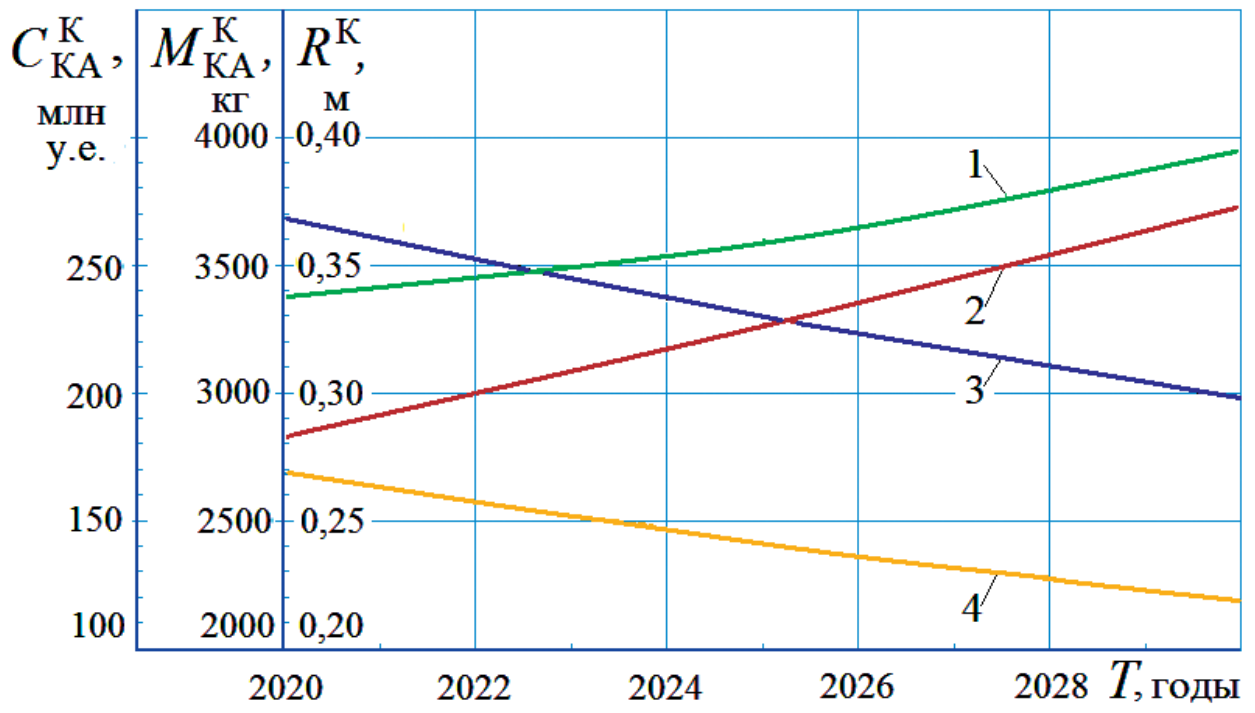


Рис. 13. Результаты расчета характеристик КА ДЗЗ (пространственного разрешения СА, массы и стоимости создания КА) с оптико-электронной комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) СА видимого и ближнего инфракрасного диапазонов на период прогнозирования 10 лет (2020 – 2030 гг.):

1 – M_{KA}^K ; 2 – C_{KA}^K ; 3 – R^K (H = 618 км); 4 – R^K (H = 450 км)

Выводы

1. Разработан метод решения задачи средне-срочного прогнозирования рациональных характеристик перспективного КА ДЗЗ (пространственного разрешения съёмочной аппаратуры, массы КА и стоимости его создания). Определены статистические данные по прототипам существующей оптико-электронной СА следующих типов: панхроматической видимого диапазона; мультиспектральной и комбинированной (мультиспектральной и панхроматической) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

2. На основе апостериорной (статистической) информации характеристик образцов-прототипов СА и КА корреляционным и регрессионным методами сформированы зависимости, отражающие изменение прогнозируемых характеристик КА ДЗЗ (пространственного разрешения целевой (съёмочной) аппаратуры, массы и стоимости создания КА) в зависимости от времени и технических характеристик.

3. Разработан алгоритм, и приведены результаты расчета прогнозируемых характеристик КА ДЗЗ: пространственного разрешения СА различного типа, массы и стоимости создания КА до 2030 г. Результаты расчета показывают, что к 2030 г. прогнозируется для КА с панхроматической и комбинированной СА увеличение пространственной разрешающей способности до 0,2 м с наибольшим диаметром ОС типа Корша до 1,5 м, массы до 4000 кг, незначительное увеличение стоимости создания до 300 млн долл. США; для КА с мультиспектральной СА увеличение пространственной разрешающей способности до 3 м с наибольшим диаметром ОС до 0,3 м, массы до 500 кг и стоимости до 60 млн долл. США.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения проекта по базовой части государственного задания № FSFF-2020-0016.

Библиографический список

1. Голубков Г.В., Манжелий М.И., Берлин А.А., Морозов А.Н., Эппельбаум Л.В. Проблемы спутниковой навигации и зондирования поверхности Земли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. № 1(76). С. 61-73. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1-61-73
2. Grishin V.A. Estimation of Visual Shoreline Navigation Errors // Journal of Navigation. 2019. Vol. 72. No. 2, pp. 389–404. DOI: 10.1017/S0373463318000875
3. Golubkov G.V., Manzhelli M.I., Berlin A.A. et al. The problems of passive remote sensing of earth surface // 5th International Conference «Atmosphere, Ionosphere Safety» (Kaliningrad, Russia). 2016. Vol. 76. No. 1, pp. 35–40. DOI 10.18698/1812-3368-2018-1
4. Kravchenko V.F., Kravchenko O.V., Pustovoit V.I., Churikov D.V., Yurin A.V. Atomic, WA-Systems, and R-Functions Applied in Modern Radio Physics Problems: Part IV // Journal of Communications Technology and Electronics. 2015. Vol. 60, pp. 1153-1190. DOI: 10.1134/S1064226915110078
5. Kravchenko V.F., Churikov D.V., Yurin A.V. Analytical Description of Complex Shape Locus with the Help of R-Operations and Atomic Functions. The Digital Signal and Image Processing // Telecommunications and Radio Engineering, 2011. Vol. 70. No. 4, pp. 283–323. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i4.10
6. Zhang J., Yan J., Ma Y., Xu D., Li P., Jie W. Infrastructures and services for remote sensing data production management across multiple satellite data centers // Cluster Computing. 2016. Vol. 19, pp. 1243-1260. DOI: 10.1007/s10586-016-0577-6
7. Chi M., Plaza A., Benediktsson J.A., Sun Z., Shen J., Zhu Y. Big data for remote sensing: challenges and opportunities // Proceedings of the IEEE. 2016. Vol. 104. No. 11, pp. 2207–2219. DOI: 10.1109/jproc.2016.2598228
8. Chen L., Ma Y., Liu P., Wei J., Jie W., He J. A review of parallel computing for large-scale remote sensing image mosaicking // Cluster Computing. 2015. Vol. 18. No. 2, pp. 517–529.
9. Darnopykh V.V., Efanov V.V., Zanin K.A., Malyshev V.V. Synthesis of an Information Channel in Planning Goal Functioning of Space Remote Sensing Systems According to Quality Criteria // Journal of Computer and System Sciences international. 2010. Vol. 49. No. 4, pp. 607–614. DOI: 10.1134/S1064230710040118
10. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Оптимизация параметров космической системы дистанционного зондирования Земли с учетом особенностей проектно-конструкторских решений космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 6. С. 55-66.
11. Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В. Методы прогнозирования характеристик модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд-во МАИ, 2019. – 158 с.
12. Занин К.А., Москатиньев И.В. Основные направления развития зарубежных оптико-электронных

- космических систем дистанционного зондирования Земли (обзор) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 2(44). С. 28–36. DOI: 10.26162/LS.2019.44.2.003
13. *Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А.* и др. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 30–35. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-30-35
 14. *Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В.* Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. — М.: Изд-во МАИ, 2015. — 176 с.
 15. *Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В.* Метод прогнозных исследований эффективности модификаций КА при комплексной замене подсистем // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 4(30). С. 53–59.
 16. *Алифанов О.М., Матвеев Ю.А., Ламзин В.В., Ламзин В.А.* Методические основы прогнозирования эффективной модернизации космических систем ДЗЗ // Авиация и космонавтика — 2010: Сборник тезисов докладов 9-й Международной конференции (16-18 ноября 2010; Москва). СПб.: Мастерская печати, 2010. С. 102–103.
 17. *Ламзин В.В.* Исследование характеристик оптико-электронной космической системы дистанционного зондирования Земли при модернизации в планируемый период // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 46-55.
 18. *Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В.* Исследование влияния надежности модификаций КА на программу развития космической системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 1(27). С. 41–47.
 19. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Издательство А и Б, 1997. — 296 с.
 20. *Матвеев Ю.А., Ламзин В.В.* Космические системы дистанционного зондирования Земли: состояние и перспективы развития // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 5. С. 31–37.
 21. *Кучейко А.А.* (ред.) Космическая съемка Земли. Спутники оптической съемки Земли с высоким разрешением. — М.: Радиотехника, 2001. — 136 с.
 22. *Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А.* и др. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. С. 15–23.
 23. *Полищук Г.М., Пичхадзе К.М., Мошечев А.А.* и др. Новая серия космических аппаратов «Аркон» // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2006. № 11. С. 3–6.
 24. *Горелов В.А., Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2002. №№ 4, 5. 2003. №№ 1, 2.
 25. *Фортескью П., Суайнерд Г., Старк Д.* (ред.) Разработка систем космических аппаратов / Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2015. — 765 с.
 26. *Costes V., Cassar G., Escarrat L., Conseil S.* Optical design of a compact telescope for the next generation earth observation system // International conference on Space Optics — ICSO 2012 (20 November 2017; Ajaccio-Corsica, France). DOI: 10.1117/12.2309055

METHOD FOR CHARACTERISTICS PREDICTING OF PROSPECTIVE EARTH PROBING SPACECRAFT WITH OPTOELECTRONIC IMAGING HARDWARE

Lamzin V.A., Lamzin V.V.

Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia
e-mail: 8465836@mail.ru

Abstract

The article deals with the task of medium-term forecasting of rational characteristics (imaging hardware spatial resolution, weight and cost) of a prospective spacecraft for remote Earth probing with optoelectronic imaging hardware. It proposes a method for the task solving employing extrapolation methods based on the statistical data on the products prototypes. Forecasting is being performed by extrapolating into the future the regularities revealed in the process of studying characteristics up to the present moment.

For the proposed method realization, the searching algorithm, including such blocks as initial data, extrapolating prediction and a spacecraft characteristics evaluation, was developed, and the results of its technical-and-economic characteristics at the medium-term forecasting are presented. The source data block includes information on the characteristics of the Earth remote probing spacecraft with optoelectronic imaging hardware of various types. Statistical data processing on the characteristic (parameter) under study is being performed in the extrapolating prediction block. It is assumed herewith that parameter realization is a random function of time (a forecast function).

Characteristics predicting of the Earth remote probing spacecraft is being performed for the following types of optoelectronic imaging hardware: panchromatic range; multispectral visible and near-infrared ranges; combined (panchromatic and multispectral) visible and near-infrared ranges. The article presents the computational results of Earth remote probing spacecraft characteristics being predicted, such as spatial resolution of imaging hardware of various types, weight and cost of the spacecraft creation up to 2030.

Computational results show that the following improvements are forecasted for the spacecraft with panchromatic and combined imaging hardware:

- The spatial resolution improvement up to 0.19–0.22 m with maximum diameter of the Korsch type optical system up to 1.3–1.4 m;

- Weight improvement up to 3000–4000 kg;
- Insufficient cost of creation increase up to 235 million of conventional units.

For the spacecraft with multispectral imaging hardware:

- The spatial resolution improvement up to 3.0–4.0 m;
- Optical system diameter up to 0.25–0.32 m;
- Weight improvement up to 500 kg, and cost of creation increase up to 60 million of conventional units.

Thus, the method proposed in the article and developed design models allow predicting technical-and-economic characteristics of prospective modifications of the Earth remote probing spacecraft for 7–10 years, and ensuring necessary research accuracy.

Keywords: remote Earth probing, space system, prospective spacecraft, optoelectronic survey instruments, forecasting, spacecraft technical-and-economic characteristics.

References

1. Golubkov G.V., Manzhelii M.I., Berlin A.A., Morozov A.N., Eppel'baum L.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana*, 2018, no. 1(76), pp. 61–73. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1-61-73
2. Grishin V.A. Estimation of Visual Shoreline Navigation Errors. *Journal of Navigation*, 2019, vol. 72, no. 2, pp. 389–404. DOI: 10.1017/S0373463318000875
3. Golubkov G.V., Manzhelii M.I., Berlin A.A. et al. The problems of passive remote sensing of earth surface. *5th International Conference "Atmosphere, Ionosphere Safety" (Kaliningrad, Russia)*, 2016, vol. 76, no. 1, pp. 35–40. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-1
4. Kravchenko V.F., Kravchenko O.V., Pustovoit V.I., Churikov D.V., Yurin A.V. Atomic, WA-Systems, and R-Functions Applied in Modern Radio Physics Problems: Part IV. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, pp. 1153–1190. DOI: 10.1134/S1064226915110078
5. Kravchenko V.F., Churikov D.V., Yurin A.V. Analytical Description of Complex Shape Locus with the Help of R-Operations and Atomic Functions. The

- Digital Signal and Image Processing. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2011, vol. 70, no. 4, pp. 283–323. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i4.10
6. Zhang J., Yan J., Ma Y., Xu D., Li P., Jie W. Infrastructures and services for remote sensing data production management across multiple satellite data centers. *Cluster Computing*, 2016, vol. 19, pp. 1243–1260. DOI: 10.1007/s10586-016-0577-6
 7. Chi M., Plaza A., Benediktsson J.A., Sun Z., Shen J., Zhu Y. Big data for remote sensing: challenges and opportunities. *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, no. 11, pp. 2207–2219. DOI: 10.1109/jproc.2016.2598228
 8. Chen L., Ma Y., Liu P., Wei J., Jie W., He J. A review of parallel computing for large-scale remote sensing image mosaicking. *Cluster Computing*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 517–529.
 9. Darnopykh V.V., Efanov V.V., Zanin K.A., Malyshev V.V. Synthesis of an Information Channel in Planning Goal Functioning of Space Remote Sensing Systems According to Quality Criteria. *Jornal of Computer and System Sciences international*, 2010, vol. 49, no. 4, pp. 607–614. DOI: 10.1134/S1064230710040118
 10. Matveev Y.A., Lamzin V.V. Optimization of parameters of earth remote sensing space system taking into account the features of spacecraft designer decisions. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 55–66.
 11. Matveev Yu.A., Lamzin V.A., Lamzin V.V. *Metody prognozirovaniya kharakteristik modifikatsii kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Methods for characteristics predicting of spacecraft modifications for remote Earth probing), Moscow, MAI, 2019, 158 p.
 12. Zanin K.A., Moskatin'ev I.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2019, no. 2(44), pp. 28–36. DOI: 10.26162/LS.2019.44.2.003
 13. Baklanov A.I., Blinov V.D., Gorbunov I.A. et al. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-30-35
 14. Matveev Yu.A., Lamzin V.A., Lamzin V.V. *Osnovy proektirovaniya modifikatsii kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Fundamentals of spacecraft modifications designing for remote Earth probing), Moscow, MAI, 2015, 176 p.
 15. Matveev Yu.A., Lamzin V.A., Lamzin V.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2015, no. 4(30), pp. 53–59.
 16. Alifanov O.M., Matveev Yu.A., Lamzin V.V., Lamzin V.A. *Materialy IX Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika – 2010"* (16–18 November 2010; Moscow), St. Petersburg, Masterskaya pechati, 2010, pp. 102–103.
 17. Lamzin V.V. A performance investigation for optical-electronic Earth remote sensing system during planned upgrade. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 46–55.
 18. Matveev Yu.A., Lamzin V.A., Lamzin V.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2015, no. 1(27), pp. 41–47.
 19. Garbuk S.V., Gershenzon V.E. *Kosmicheskie sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Space systems for remote Earth probing), Moscow, Izdatel'stvo A i B, 1997, 296 p.
 20. Matveev Yu.A., Lamzin V.V. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2007, no. 5, pp. 31–37.
 21. Kucheiko A.A. (ed) *Kosmicheskaya s"emka Zemli. Sputniki opticheskoi s"emki Zemli s vysokim razresheniem* (Space survey of the Earth. Satellites of the Earth optical survey with high resolution), Moscow, Radiotekhnika, 2001, 136 p.
 22. Sevast'yanov N.N., Branets V.N., Panchenko V.A. et al. *Trudy MFTI*, 2009, vol. 1, no. 3, pp. 15–23.
 23. Polishchuk G.M., Pichkhadze K.M., Moisheev A.A. et al. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2006, no. 11, pp. 3–6.
 24. Gorelov V.A., Lukashovich E.L., Strel'tsov V.A. *Informatsionnyi byulleten' GIS-Assotsiatsii*, 2002, no. 4-5, 2003, no. 1-2.
 25. Fortescue P., Swinerd G., Stark J. (eds) *Spacecraft systems engineering*. Wiley, 4th edition, 2011, 724 p.
 26. Costes V., Cassar G., Escarrat L., Conseil S. Optical design of a compact telescope for the next generation earth observation system. *International conference on Space Optics - ICSO 2012 (20 November 2012; Ajaccio-Corsica, France)*. DOI: 10.1117/12.2309055